

МЕТРОЛОГІЧНА ПРОСТЕЖУВАНІСТЬ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

*Валентин Ісаєв, к.т.н., Олег Величко, д.т.н., проф.
Державне підприємство “Укрметртестстандарт”, Україна;
e-mail: black2001w@gmail.com*

Резюме

Критично важливим сегментом електротехнічної галузі є постачання електроенергії з використанням високовольтних технологій. Метрологічна надійність засобів вимірювання напруги, сили струму та електричної енергії підтверджується своєчасною перевіркою відповідності похибок вимірювання вимогам стандартів. При експортно-імпортних операціях з електроенергією на передній план виходить визнання результатів вимірювання та тестування на міжнародному рівні. Метрологічна простежуваність та оцінка невизначеності вимірювання, які встановлюються при калібруванні еталонів та засобів вимірювання, є важливими компонентами при визнанні результатів вимірювання. Стаття представляє діапазони значень вимірювання напруги та сили змінного струму, діапазони відповідної невизначеності вимірювань та використовувані еталони, пов'язані у схемах ланцюгів метрологічної простежуваності. Побудова та висвітлення ланцюгів метрологічної простежуваності для засобів вимірювання високої напруги та великої сили змінного струму за допомогою вимірювальних трансформаторів є актуальною задачею, що вирішується в роботі. Запропоновані ланцюги ієрархії метрологічної простежуваності використовуються в Україні, зокрема у Державному підприємстві «Укрметртестстандарт», котре є зберігачем національних еталонів вищої точності. Крім іншого, вони забезпечують єдність вимірювань через калібрування вторинних та робочих еталонів, а також перевірку чи калібрування робочих засобів вимірювальної техніки для вимірювання високої напруги та великої сили змінного струму шляхом зменшення вимірюваної величини до діапазону вимірювання лічильниками електроенергії. Зазначені ланцюги можуть використовуватися акредитованими вимірювальними лабораторіями, які здійснюють калібрування робочих засобів вимірювальної техніки для масштабування високої напруги та великої сили змінного струму, тобто трансформаторів напруги та трансформаторів струму, відповідно до власної сфери акредитації.

Ключові слова

Instrument Transformer, AC Voltage, Alternating Current, Metrological Traceability, Calibration, Measurement Uncertainty

1. Вступ

Велика кількість підприємств України має розрахунково-господарчі відносини з постачальниками електричної енергії. У фокусі розрахунково-господарчих відносин завжди перебуває питання справедливості нарахування суми оплати наданих послуг, що безпосередньо залежить від коректності обміну даними між складовими системи обліку. Іншими словами, обсяг наданої послуги повинен мати достовірне підтвердження, а розрахунок суми до сплати відповідно до чинного тарифу повинен чітко відповідати розміру спожитої електричної енергії. Такі засоби вимірювання як лічильники електроенергії та вимірювальні трансформатори створені для достовірного нарахування оплати за спожиті енергоресурси. Електроенергія для потужних підприємств генерується великими електростанціями за високої напруги та великої сили струму. Тому, в ланцюзі перетворення інформації про спожиту електроенергію визначальними засобами масштабного перетворення високої напруги змінного струму (НЗС) є трансформатори напруги (ТН), а для масштабування великої сили змінного струму (СЗС) використовують трансформатори струму (ТС).

Особливого значення набуває достовірність обліку спожитої електроенергії при міждержавних розрахунках, що потребує підтвердження метрологічних характеристик засобів вимірювання з визнанням на міжнародному рівні. В Україні вимірювальні трансформатори є законодавчо регульованими засобами вимірювальної техніки та підлягають повірці. В свою чергу, робочі еталони для повірки повинні мати сертифікати калібрування, де зазначено інформацію про невизначеність вимірювань та відомості про метрологічну простежуваність [1] до міжнародної системи СІ [2].

Найкращий в країні рівень невизначеності вимірювань НЗС та СЗС визначається метрологічними характеристиками відповідних національних еталонів (НЕ) [3]-[5]. Невизначеність вимірювання при використанні НЕ не повинна суттєво відрізнятися від значень аналогічних еталонів інших країн. Метрологічна простежуваність зазвичай виникає при калібруванні засобу вимірювання [6], [7], під час якого також визначається невизначеність вимірювання [8]. НЕ повинні мати опубліковані калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС-рядки) у базі даних на сайті Міжнародного бюро мір та ваг [9]. Якщо НЕ має опубліковані СМС-рядки, тоді він забезпечує зв'язок з міжнародною системою СІ та дозволяє встановити простежуваність

вимірювань відповідної фізичної величини. НЕ має своїм завданням забезпечити державі належний рівень конкурентоздатності національних виробників у глобальній ринковій системі.

2. Недоліки

Можна виділити декілька проблемних аспектів, пов'язаних із калібруванням, а відповідно з простежуваністю та невизначеністю вимірювань при визначенні метрологічних характеристик вимірювальних трансформаторів і сенсорів. Існують кілька підходів до визначення амплітудних та кутових похибок цих засобів вимірювання, наприклад, в межах лабораторії [10], де існують найкращі умови для калібрування, або на місці експлуатації [11], де виникає багато питань щодо підключення до встановленого обладнання. Зокрема, подолання проблеми з заземленням вимірювального обладнання та вимогами до високовольтних ізоляторів за допомогою безконтактних сенсорів напруги супроводжується збільшенням значень похибок вимірювання [12]. Також з'являються нетрадиційні підходи до визначення похибок вимірювальних трансформаторів, наприклад, методом використання великих обсягів накопичених даних з великою деталізацією [13]. В той же час, удосконалюється традиційний підхід до калібрування ТС для дослідження раніше не оцінених факторів впливу, зокрема індукованого високою напругою струму витоку на результати калібрування [14].

З розвитком сучасних цифрових технологій перед калібрувальними лабораторіями постають нові виклики, як то подолання проблем з конструктивними особливостями цифрових вимірювальних трансформаторів [15], врахування впливу температури при віддаленому калібруванні [16], коригування похибок за допомогою сучасної системи обробки вимірювальної інформації [17]. Інтегрування цифрових технологій у систему енергопостачання дозволило застосувати метод онлайн моніторингу метрологічних характеристик емісних ТН [18]. На відміну від цього підходу, застосування удосконаленого методу порівняння з еталоном дозволило також калібрувати вимірювальні трансформатори для потреб оцінювання якості електроенергії [19]. Проте, в представлених роботах залишаються певні питання щодо метрологічної простежуваності, зокрема, у роботі [20] розглянутий аспект врахування відгалуження напрямку простежуваності через застосування засобу порівняння двох порівнюваних вторинних напруг чи порівнюваних сил струму.

3. Мета

Метою даної роботи є висвітлення особливостей встановлення метрологічної простежуваності вимірювань високої НЗС в діапазоні від 1 кВ до $1,2 \cdot 330/\sqrt{3}$ кВ та великої СЗС в діапазоні до 3 кА для забезпечення зв'язку з міжнародною системою СІ та визнання результатів вимірювання на міжнародному рівні. При чому, вимірювані величини масштабно зменшуються за допомогою вимірювальних ТН та ТС до значень, сумісних з діапазоном вимірювання лічильників електричної енергії в системах енергообліку, зокрема при експорті чи імпорті електричної енергії.

4. Національні еталони коефіцієнтів масштабного перетворення напруги та сили змінного струму

4.1 Національний еталон коефіцієнта масштабного перетворення напруги змінного струму

НЕ коефіцієнту масштабного перетворення НЗС призначений для метрологічного забезпечення вимірювань високої НЗС за допомогою ТН. Він розроблений та функціонує в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт» (УМТС, Київ, Україна) з 1999 року. Він зберігає одиниці НЗС та КМПНЗС і забезпечує зв'язок з міжнародною системою СІ та точні вимірювання високої НЗС в діапазоні від 1 до $1,2 \cdot 330/\sqrt{3}$ кВ. Метрологічні характеристики НЕ коефіцієнту масштабного перетворення НЗС:

- діапазон номінальних значень первинної напруги – від 1 до $330/\sqrt{3}$ кВ;
- діапазон номінальних значень вторинної напруги – від $100/3$ до 150 В;
- стандартне відхилення результату вимірювання при відтворенні коефіцієнту масштабного перетворення НЗС – не більше $1 \cdot 10^{-4}$;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від $7 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення становить – від 0.5 до 1.5 min;
- річна нестабільність – не більше $1 \cdot 10^{-4}$.

НЕ коефіцієнту масштабного перетворення НЗС не підлягає транспортуванню та складається з наступних частин:

4 міри коефіцієнту масштабного перетворення НЗС М1 (містить кілька індуктивних масштабних перетворювачів НЗС литого типу) – до 15 кВ, М2 (індуктивний масштабний перетворювач НЗС масляного типу) – до $110/\sqrt{3}$ кВ, М3 (індуктивний масштабний перетворювач НЗС масляного типу) – до $330/\sqrt{3}$ кВ, масштабного перетворювача низької напруги, прецизійного вимірювача різниці напруги, вимірювачі низької НЗС до 200 В, комплекс пристроїв для дослідження мір коефіцієнту масштабного перетворення НЗС.

Загальний вигляд ДЕТУ 08-05-99 представлено на рис. 1.



Fig. 1. The general view of the National Standard of the AC Voltage Scale Coefficient

Застосування масштабного перетворювача низької напруги дозволяє порівнювати вторинні напруги двох ТН при калібруванні з роздільною здатністю 0,001 В для вторинної напруги 100 В. Процес визначення метрологічних характеристик (ratio error and phase displacement) еталонного ТН, що піддається калібруванню, реалізовано шляхом прикладання високої напруги від підвищувального трансформатора живлення до паралельно з'єднаних первинних обмоток. Завдяки застосуванню методу одночасного порівняння двох вторинних напруг, передавання розміру коефіцієнту масштабного перетворення НЗС супроводжується високою стабільністю показів вимірювача різниці напруги. Метрологічні характеристики еталонного ТН визначають при навантаженні його вторинної обмотки за допомогою магазину провідності, задаючи необхідне значення потужності. За допомогою підвищувального трансформатора живлення встановлюються потрібні значення первинної напруги.

При калібруванні робочого чи вторинного еталона необхідно визначати дійсні значення похибок коефіцієнта еталонного трансформатора з урахуванням дійсного значення коефіцієнта масштабного перетворення НЕ, що розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{VX} = \frac{K_{VX} - K_{VS}}{K_{VS}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де K_{VX} – коефіцієнт масштабного перетворення НЗС робочого еталона, визначений під час калібрування; K_{VS} – дійсне значення коефіцієнта масштабного перетворення напруги НЕ.

Стосовно другої метрологічної характеристики – фазового зміщення між первинною та вторинною напругами – вона визначається за формулою:

$$D_{j_{VX}} = j_{VX} - j_{VS}, \quad (2)$$

де j_{VX} – кутова похибка масштабного перетворення НЗС робочого еталона, визначена під час калібрування; j_{VS} – дійсне значення фазового зміщення між первинною та вторинною напругами НЕ одиниці коефіцієнта НЗС.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання при визначенні коефіцієнта масштабного перетворення НЗС еталонного ТН розраховується за рівнянням:

$$u_{\varepsilon VX} = \sqrt{(c_{KVS} \cdot u_{KVS})^2 + (c_{KVX} \cdot u_{KVX})^2}, \quad (3)$$

де c_{KVS} – коефіцієнт чутливості похибки коефіцієнта еталонного ТН, що піддається калібруванню, до зміни коефіцієнта масштабного перетворення напруги НЕ; u_{KVS} – стандартна невизначеність типу В коефіцієнта масштабного перетворення напруги НЕ; c_{KVX} – коефіцієнт чутливості похибки

коефіцієнта еталонного ТН, що піддається калібруванню, до зміни коефіцієнта масштабного перетворення НЗС робочого еталона; $u_{KVX}u_{KVX}$ – стандартна невизначеність типу А коефіцієнта масштабного перетворення НЗС робочого еталона, визначена як середнє квадратичне відхилення під час калібрування.

Калібрувальні та вимірювальні можливості НЕ коефіцієнта масштабного перетворення НЗС України є порівнюваними з характеристиками вимірювальних систем аналогічного призначення інших НМІ, декотрі з яких представлені у таблиці 1 [9].

Таблиця 1 Метрологічні характеристики деяких національних еталонів для коефіцієнта шкали високої напруги змінного струму

Країна, НМІ	Максимальна напруга, кВ	Розширена невизначеність, мкВ/В
Аргентина, INTI	525	200
Австралія, NMIA	500	60
Грузія, GEOSTM	70	100
Чехія, СМІ	400	100
Україна, УМТС	220	300
Німеччина, РТВ	277	10
Уругвай, UTE	150	300
Південна Корея, KRISS	200	40
Угорщина, BFKH	70	170
Канада, NRC	500	20

У Таблиці 1 видно, що найкращі серед перелічених СМС-можливостей задекларовані канадським НМІ (NRC) з огляду на співвідношення між максимальною напругою та відповідною невизначеністю вимірювання. Відмітимо, що залежно від рівня технічного розвитку окремої країни, відповідний НМІ забезпечує СМС-сервіс до певного значення НЗС. Так, Грузія, Уругвай, Південна Корея, та Угорщина встановлюють метрологічну простежуваність для вимірювань НЗС з допомогою ТН до рівня, нижчого, ніж в Україні. Інші представлені у таблиці НМІ забезпечують кращі рівні максимальної напруги та невизначеність вимірювання.

4.2 Національний еталон коефіцієнта масштабного перетворення сили змінного струму

НЕ коефіцієнта масштабного перетворення СЗС призначений для метрологічного забезпечення вимірювань великої СЗС за допомогою ТС. Він розроблений та функціонує в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт» (УМТС, Київ, Україна) з 2007 року. Він зберігає одиницю коефіцієнту масштабного перетворення СЗС і забезпечує зв'язок з міжнародною системою СІ, а також точне вимірювання СЗС в діапазоні від 10 А до 1,2·10 кА на промисловій частоті. Метрологічні характеристики НЕ коефіцієнту масштабного перетворення СЗС:

- діапазон номінальних значень первинної сили струму – від 0,5 до 10000 А;
- номінальна вторинна сила струму – 1 та 5 А;
- стандартне відхилення результату вимірювання при відтворенні коефіцієнту масштабного перетворення СЗС – не більше $1,5 \cdot 10^{-5}$;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від $3,2 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення становить – від 0.3 до 1 min;
- річна нестабільність – не більше $1 \cdot 10^{-5}$.

НЕ коефіцієнту масштабного перетворення СЗС не підлягає транспортуванню та складається з наступних частин:

3 міри коефіцієнту масштабного перетворення СЗС М1 (містить кілька вхідних і кілька вихідних обмоток) – до 1 кА, М2 (двоступеневий ТС, який забезпечує коефіцієнт трансформації, рівний 100) – до 5 кА, М3 (застосовується в поєднанні з мірою М1 та має декілька вторинних обмоток) – до 10 кА, компаратора СА507, стенду керування для струмів від 0,5 до 3000 А, трансформатор живлення вимірювального кола до 10 кА, спеціалізоване допоміжне обладнання.

Калібрування еталонних засобів вимірювальної техніки здійснюється звірянням за допомогою компаратора СА507, який входить до складу НЕ. Функціонування мір коефіцієнту масштабного перетворення СЗС М1, М2 та М3 при відтворенні та передачі розміру одиниці коефіцієнту масштабного перетворення СЗС від НЕ робочим еталонам забезпечується за допомогою комплексу енергетичного обладнання. Призначення енергетичного обладнання полягає у забезпеченні електричного струму частотою 50 Гц з необхідними параметрами (діапазон сили струмів, коефіцієнт несинусоїдальності та стабільність заданого значення сили струму у короткому відрізку часу) у контурі первинного струму еталона та робочого еталона, якому передається розмір одиниці коефіцієнту масштабного перетворення СЗС. Енергетичне обладнання еталона поділяється на два автономних комплекси, які виконують призначені функції еталона у трьох діапазонах сили струмів: перший діапазон – від 0,5 до 3000 А, другий – від 3000 до 10000 А. Такий поділ обумовлений технічними особливостями елементів електрообладнання (силових трансформаторів, регуляторів напруги), які використовуються у складі енергетичного обладнання для створення і живлення електричних ланцюгів.

Живлення вимірювальної схеми забезпечується за допомогою двох джерел живлення: однофазного – напругою 380 В і потужністю 76 кВт·А, та трифазного – напругою 380 В і потужністю 24 кВт·А. Загальний вигляд НДЕТУ ЕМ-02-2019 представлено на рис. 2.

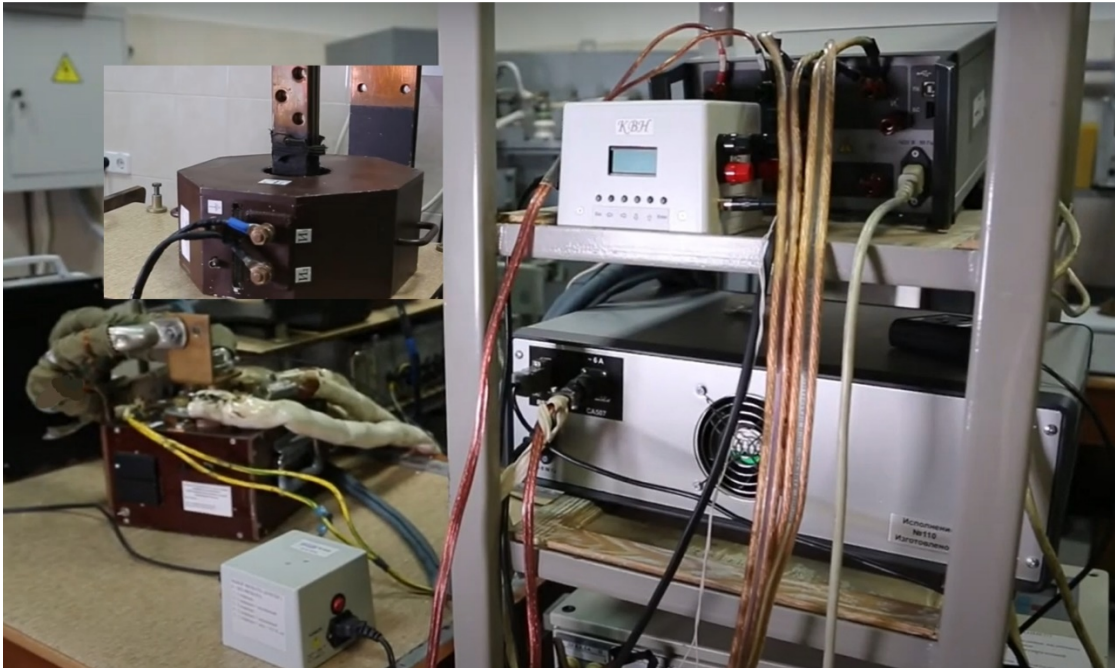


Fig. 2. The general view of the National Standard of the AC Current Scale Coefficient

Завдяки застосуванню методу одночасного порівняння двох вторинних сил струму, передавання розміру коефіцієнту масштабного перетворення СЗС супроводжується високою стабільністю показів компаратора змінного струму. Оскільки цей засіб вимірювання також робить внесок у сумарну невизначеність вимірювань, його метрологічні характеристики також були оцінені [21]. Метрологічні характеристики еталонного ТС визначають при навантаженні його вторинної обмотки за допомогою магазину опору, задаючи необхідне значення потужності. За допомогою підвищувального трансформатора живлення встановлюються потрібні значення первинної сили струму.

При калібруванні робочого чи вторинного еталона необхідно визначати дійсні значення похибок коефіцієнта еталонного ТС з урахуванням дійсного значення коефіцієнта масштабного перетворення сили струму НЕ, що розраховується за формулою:

$$\varepsilon_{CX} = \frac{K_{CX} - K_{CS}}{K_{CS}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де K_{CX} – коефіцієнт масштабного перетворення СЗС робочого еталона, визначений під час калібрування; K_{CS} – дійсне значення коефіцієнта масштабного перетворення сили струму НЕ.

Стосовно другої метрологічної характеристики – фазового зміщення між первинною та вторинною силами струму – вона визначається за формулою:

$$Dj_{CX} = j_{CX} - j_{CS}, \quad (5)$$

де j_{CX} – кутова похибка масштабного перетворення СЗС робочого еталона, визначена під час калібрування; j_{CS} – дійсне значення фазового зміщення між первинною та вторинною силами струму НЕ одиниці коефіцієнта СЗС.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання при визначенні коефіцієнта масштабного перетворення СЗС еталонного ТС розраховується за рівнянням:

$$u_{\varepsilon CX} = \sqrt{(c_{KCS} \cdot u_{KCS})^2 + (c_{K_{CX}} \cdot u_{K_{CX}})^2}, \quad (6)$$

де $c_{KCS}c_{KCS}$ – коефіцієнт чутливості похибки коефіцієнта еталонного ТС, що піддається калібруванню, до зміни коефіцієнта масштабного перетворення сили струму НЕ; $u_{KCS}u_{KCS}$ – стандартна невизначеність типу В коефіцієнта масштабного перетворення сили струму НЕ; $c_{KCX}c_{KCX}$ – коефіцієнт чутливості похибки коефіцієнта еталонного ТС, що піддається калібруванню, до зміни коефіцієнта масштабного перетворення СЗС робочого еталона; $u_{KCX}u_{KCX}$ – стандартна невизначеність типу А коефіцієнта масштабного перетворення СЗС робочого еталона, визначена як середнє квадратичне відхилення під час калібрування.

У таблиці 2 подані відомості про калібрувальні та вимірювальні можливості НЕ коефіцієнту масштабного перетворення СЗС України та аналогічні характеристики вимірювальних систем деяких інших НМІ [9].

Таблиця 2

Метрологічні характеристики деяких національних еталонів для коефіцієнта шкали високого змінного струму

Країна, НМІ	Максимальна сила струму, А	Розширена невизначеність, мкА/А
Швеція, RISE	7500	60
Саудівська Аравія, SASO-NMCC	4000	120
Бразилія, INMETRO	5000	35
Австралія, NMIA	20000	15
Нова Зеландія, MSL	4000	500
Австрія, BEV	10000	50
Україна, УМТС	10000	80
Угорщина, BFKH	5000	30
Південна Корея, KRISS	20000	30
Уругвай, UTE	8000	150

Відповідно до Таблиці 2, кращі серед представлених СМС-можливості задекларовані австралійським НМІ (NMIA). Видно, що Австралія, Австрія та Південна Корея встановлюють метрологічну простежуваність для вимірювань СЗС з допомогою ТС до вищого максимального значення, ніж в Україні. При цьому, зазначені НМІ декларують меншу невизначеність вимірювання. Інші представлені у таблиці НМІ забезпечують нижчі рівні максимальної сили струму, хоча інколи з кращою невизначеністю вимірювання.

5. Ланцюги метрологічної простежуваності для коефіцієнтів масштабного перетворення напруги та сили змінного струму

5.1 Метрологічна простежуваність для вимірювання напруги змінного струму до 500/√3 кВ за допомогою трансформаторів напруги

Відповідно до інформації, зазначеної у базі даних КСДБ Міжнародного бюро з мір та ваг, калібрувальні та вимірювальні можливості національних метрологічних інститутів передбачають вимірювання та відтворення високої НЗС за допомогою: індуктивних та ємнісних ТН; високовольтних кіловольтметрів НЗС; високовольтних джерел НЗС; високовольтних еталонних конденсаторів; системи вимірювання середнього квадратичного значення високої напруги; високовольтних резистивно-ємнісних дільників.

В контексті зменшення НЗС до значень, вимірюваних лічильниками в системах обліку електроенергії, більшу вагу мають засоби масштабного перетворення – ТН. Найбільш розповсюдженими в Україні є ТН класів напруги до 330 кВ. Цей діапазон покриває еталон ДЕТУ 08-05-99, який є верхньої ланкою у ланцюзі метрологічної простежуваності вимірювань із застосуванням ТН, що підтверджено міжнародними звіряннями [3]. Крім того, застосування методу подвоєння [22] при калібруванні ТН дозволяє розширити діапазон напруги, в якому виконується передавання розміру одиниці напруги, до робочих значень вторинних еталонів. Вторинними еталонами до 500/√3 кВ для калібрування робочих еталонів в Україні зазвичай є спеціально розроблені та ретельно досліджені еталонні високовольтні ТН змінного струму з такими метрологічними характеристиками:

- діапазон номінальної первинної напруги від 1 кВ до 500/√3 кВ;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від $1,5 \cdot 10^{-4}$ до $5,0 \cdot 10^{-4}$;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення – від 1.5 до 3 min.

Робочими еталонами до 330/√3 кВ при повірці робочих ТН в Україні є еталонні високовольтні ТН змінного струму з такими метрологічними характеристиками:

- діапазон номінальної первинної напруги від 1 кВ до 500/√3 кВ;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від 0,1% до 0,3%;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення – від 5 до 12 min.

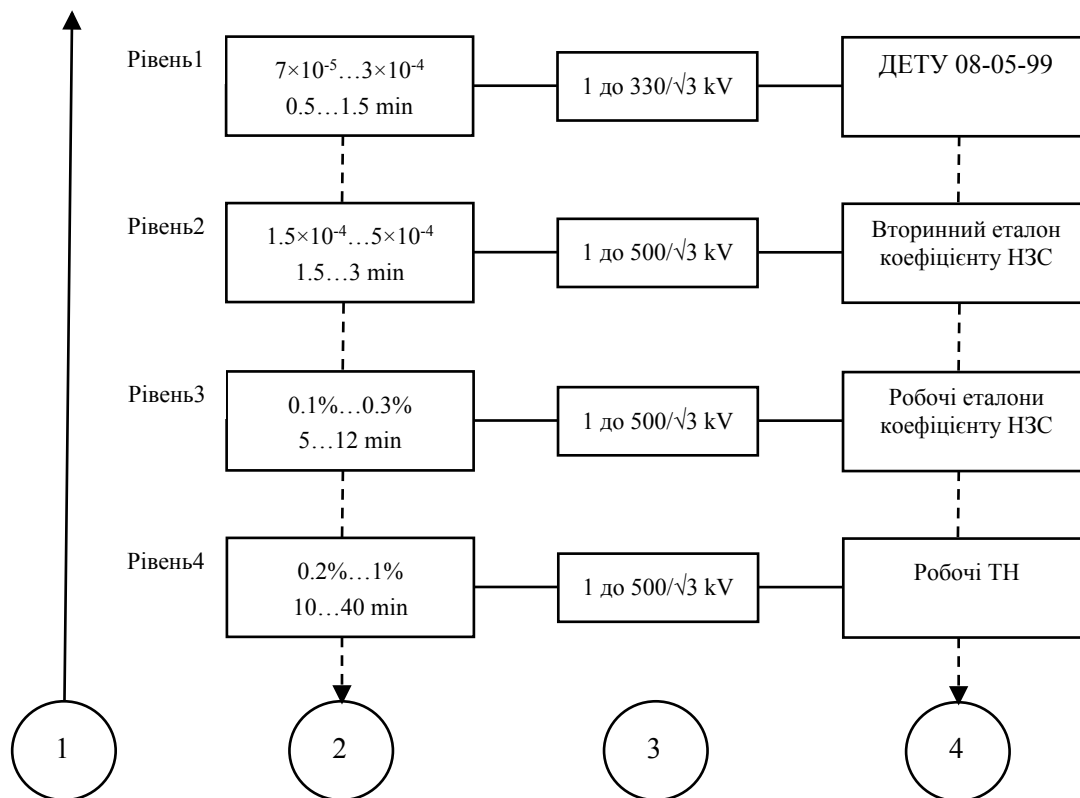


Рис. 3. Ланцюг метрологічної простежуваності для коефіцієнту масштабного перетворення напруги змінного струму: 1 – метрологічна простежуваність; 2 – невизначеність вимірювання; 3 – рівень напруги; 4 – ієрархія калібрувань

На рис. 3 представлений ланцюг метрологічної простежуваності для вимірювання високої НЗС, масштабованої за допомогою ТН. Він складається з чотирьох рівнів ієрархії калібрування та базується на аналітичному дослідженні. На вищому рівні (рівень 1) ієрархії знаходиться ДЕТУ 08-05-99, на другому рівні (рівень 2) – вторинні еталони високої НЗС, на третьому рівні (рівень 3) – робочі еталони високої НЗС, а на четвертому (рівень 4) – робочі вимірювальні ТН, котрі створюють вхідну вимірювану величину (НЗС) для лічильників електричної енергії. Низхідні гілки ланцюга показують еталони вимірювань або засоби вимірювальної техніки (позначені 4) та відповідні метрологічні характеристики (позначені 2) у діапазонах вимірювання (позначені 3).

5.2 Метрологічна простежуваність для вимірювання сили змінного струму за допомогою трансформаторів струму

Відповідно до інформації, зазначеної у базі даних КСДБ Міжнародного бюро з мір та ваг, калібрувальні та вимірювальні можливості національних метрологічних інститутів також передбачають вимірювання та відтворення великої СЗС за допомогою: індуктивних ТС; неконвенційних або неіндуктивних ТС; оптичних та інших високовольтних сенсорів СЗС; перетворювачів сили струму Роговського; джерел великої СЗС; вимірювачів великої СЗС.

Зменшення СЗС до значень, необхідних для роботи лічильників в системах обліку електроенергії, переважно виконують ТС. Найбільш розповсюдженими в Україні є ТС з номінальною первинною силою струму до 3 кА, рідше до 10 кА, а інколи і вище. Цей діапазон переважно покриває еталон НДЕТУ ЕМ-02-2019, який є верхньою ланкою у ланцюзі метрологічної простежуваності вимірювань із застосуванням ТС, що підтверджено міжнародними звірваннями [23]. Вторинний еталон до 4 кА призначений для частого застосування, тобто розвантаження еталона НДЕТУ ЕМ-02-2019 та калібрування робочих еталонів, та є ретельно дослідженим еталонним ТС з такими метрологічними характеристиками:

- діапазон номінальної первинної сили струму від 0.5 А до 4 кА;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від $6 \cdot 10^{-5}$ до $3 \cdot 10^{-4}$;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення – від 0.6 до 3 min;

Робочими еталонами до 3 кА при повірці робочих ТН в Україні є еталонні лабораторні ТС з такими метрологічними характеристиками:

- діапазон номінальної первинної сили струму від 0.5 А до 3 кА;
- розширена невизначеність вимірювання для похибки співвідношення – від 0,02% до 0,2%;
- розширена невизначеність вимірювання для фазового зміщення – від 2 до 10 min.

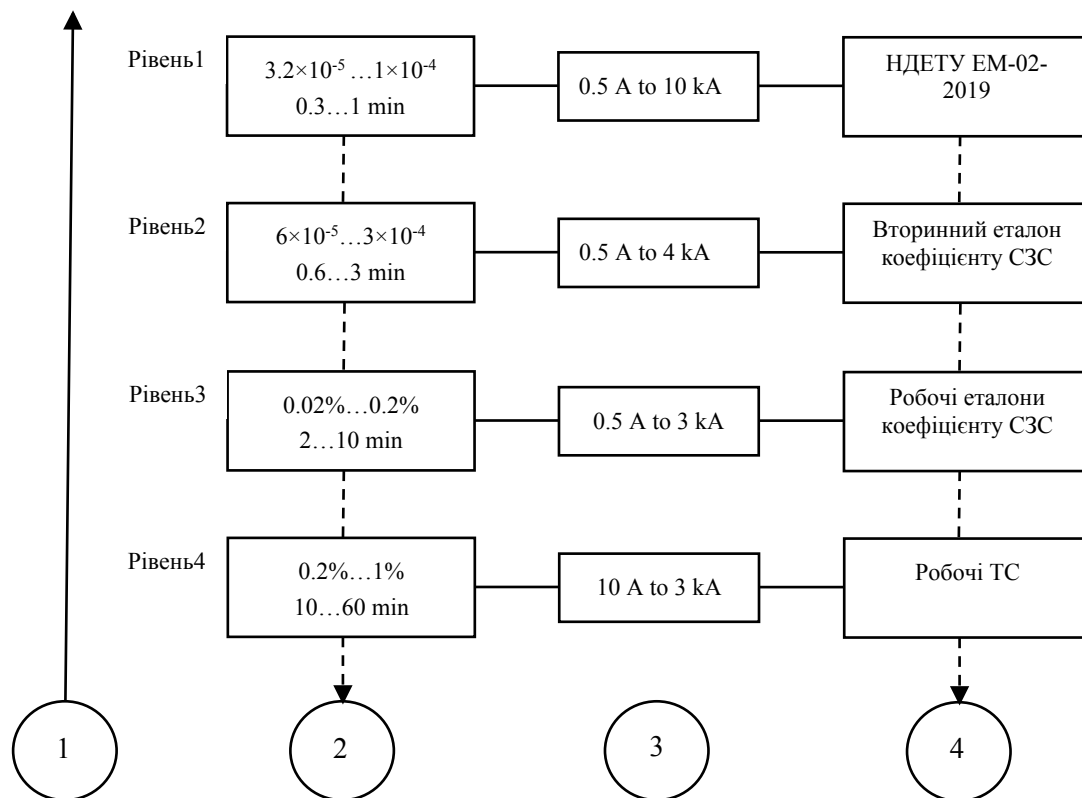


Рис. 4. Ланцюг метрологічної простежуваності для коефіцієнту масштабного перетворення сили змінного струму: 1 – метрологічна простежуваність; 2 – невизначеність вимірювання; 3 – рівень сили струму; 4 – ієрархія калібрувань

На рис. 4 представлений ланцюг метрологічної простежуваності для вимірювання великої СЗС, масштабованої за допомогою ТС. Він також складається з чотирьох рівнів ієрархії калібрування та базується на аналітичному дослідженні. На вищому рівні (рівень 1) ієрархії знаходиться НДЕТУ ЕМ-02-2019, на другому рівні (рівень 2) – вторинний еталон великої СЗС, на третьому рівні (рівень 3) – робочі еталони великої СЗС, а на четвертому (рівень 4) – робочі вимірювальні ТС, котрі створюють вхідну вимірювану величину (СЗС) для лічильників електричної енергії. Аналогічно до рис. 3, низхідні гілки ланцюга показують еталони вимірювань або засоби вимірювальної техніки (позначені 4) та відповідні метрологічні характеристики (позначені 2) у діапазонах вимірювання (позначені 3).

5. Висновки

Представлені ланцюги ієрархії метрологічної простежуваності використовуються в Державному підприємстві «Укрметртестстандарт» для калібрування вторинних і робочих еталонів та робочих вимірювальних ТС та ТН, призначених для масштабного перетворення відповідних величин. Ці ланцюги можуть бути використані також акредитованими вимірювальними лабораторіями, які здійснюють калібрування робочих вимірювальних ТС та ТН відповідно до їхньої сфери акредитації.

Конфлікт інтересів

The authors state that there are no financial or other potential conflicts regarding this work.

Посилання

- [1] S. Rab and S. Yadav, “Concept of Unbroken Chain of Traceability”, *Resonance*, vol. 27, p. 835–838, 2022.
- [2] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017.
- [3] V. Kiselev et al., “Supplementary Comparisons of National Standards of Ratio Error and Phase Displacement of AC Voltage of Power Frequency COOMET 411/RU-a/07 (COOMET. EM-S6)”, *Metrologia*, vol. 60, no. 1A, p. 01011, 2023.
- [4] B. Ayhan et al., “Bilateral Supplementary Comparison of High Voltage Transformer Measuring Systems”, *Metrologia*, vol. 60, 01005, 2023.
- [5] D. Slomovitz et al., “SIM Comparison of AC Current Ratio Using Instrument Current Transformers”, in *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, USA, 2020, pp. 1–2.

- [6] S. Dang et al., “A High-Precision Error Calibration Technique for Current Transformers under the Influence of DC Bias”, *Energies*, vol. 16, no. 24, 7917, 2023.
- [7] I. Jayathilaka et al., “Calibration System for High-Voltage Transformers with Multiharmonic Distorted Waveforms”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, 1501013, 2024.
- [8] G. Frigo and M. Agostoni, “Calibration of a Digital Current Transformer Measuring Bridge: Metrological Challenges and Uncertainty Contributions”, *Metrology*, vol. 1, no. 2, p. 93-106, 2021.
- [9] The BIPM key comparison database (KCDB), 2025. [Online]. Available: <http://kcdb.bipm.org>.
- [10] N. George et al., “A Novel Dual Slope Conversion Technique for Measurement of Ratio and Phase Errors of Current Transformer Using Comparison Method of Testing”, *Measurement*, vol. 179, 109458, 2021.
- [11] R. Stiegler et al., “Methods for On-Site Qualification and Calibration of Inductive Instrument Voltage Transformers for Harmonic Measurements”, in *CIRE2021 – The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Online Conference, 2021, pp. 752-756.
- [12] L. Yang et al., “Transmission Line Voltage Calibration-Free Measurement Method”, *Electronics*, vol. 12, no. 4, p. 814, 2023.
- [13] P. Gupta and S. A. Soman, “Three Phase Current Transformer Calibration Without External Reference IT Using Synchrophasors: An SVD Approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 38, no. 3, p. 2111-2119, 2022.
- [14] H. Van Den Brom et al., “Voltage Dependence of the Reference System in Medium- and High-Voltage Current Transformer Calibrations”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 1502908, 2021.
- [15] H. Hu et al., “Passive-Compensation Clamp-On Two-Stage Current Transformer for Online Calibration”. *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 15, no. 9, p. 730-737, 2021.
- [16] B. Verhelst et al., “On the Remote Calibration of Instrumentation Transformers: Influence of Temperature”, *Energies*, vol. 16, no. 12, 4744, 2023.
- [17] Z. Li et al., “An Online Correction System for Electronic Voltage Transformers”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 126, 106611, 2021.
- [18] Y. Zhang et al., “An Online Detection Method for Capacitor Voltage Transformer with Excessive Measurement Error Based on Multi-Source Heterogeneous Data Fusion”, *Measurement*, vol. 187, 110262, 2022.
- [19] Y. Chen et al., “Novel Calibration Systems for the Dynamic and Steady-State Testing of Digital Instrument Transformers”, in *2021 IEEE 11th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Cagliari, Italy, 2021, pp. 1-6.
- [20] V. Isaiev and I. Anokhin, “Methodological Aspects of Using Comparators for Metrological Traceability of Instrument Transformers”, *Applied Aspects of Modern Metrology*. IntechOpen, 2021.
- [21] V. Isaiev and O. Velychko, “Metrological characterisation of current transformers calibration unit for accurate measurement”, *ACTA IMEKO*, vol. 10, no. 2, p. 6-13, 2021.
- [22] V. V. Kopshin et al., “Test Setup for 110 to 500 kV Voltage Transformers”, *Measurement Technique*, no. 32, p. 156–158, 1989.
- [23] O. Velychko et al., “Final Report on GULFMET Supplementary Comparison of High Current Transformer Measuring Systems (GULFMET. EM-S7)”, *Metrologia*, vol. 59, no. 1A, p. 01012, 2022.

Дані про авторів

Ісаєв Валентин Володимирович

Кандидат технічних наук

Науково-дослідний відділ вимірювань електричних величин

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»)

вул. Метрологічна, 4, м. Київ, Україна, 03143

E-mail: black2001w@gmail.com

Контактний тел.: +38 066 6147389

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 14

Кількість статей у міжнародних базах даних – 18

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6763-9392>

Valentyn Isaiev

Candidate of Technical Sciences

R&D Department of Electrical Measurements

State Enterprise “All-Ukrainian state research and production center for standardization, metrology, certification and consumers’ rights protection” (SE

“Ukrmetrteststandard”)

Metrologichna str., 4, Kyiv, Ukraine, 03143

E-mail: black2001w@gmail.com

Contact tel.: +38 066 6147389

The number of articles in national databases – 14

The number of articles in international databases – 18

Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6763-9392>

Величко Олег Миколайович

Доктор технічних наук, професор

Науково-виробничий інститут вимірювань електромагнітних величин та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»)

вул. Метрологічна, 4, м. Київ, Україна, 03143

E-mail: velychko@hotmail.com

Контактний тел.: +38 050 4240024

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 500

Кількість статей у міжнародних базах даних – 150

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6564-4144>

Oleh Velychko

Doctor of Technical Sciences, Professor

Research and Production Institute of Electrical and Magnetic Quantities

Measurements and Measuring Instruments Conformity Assessment

State Enterprise “All-Ukrainian state research and production center for standardization, metrology, certification and consumers’ rights protection” (SE “Ukrmetrteststandard”)

Metrologichna str., 4, Kyiv, Ukraine, 03143

E-mail: velychko@hotmail.com

Contact tel.: +38 38 050 4240024

The number of articles in national databases – 500

The number of articles in international databases – 150

Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6564-4144>